Journal of Agricultural Machinery
Vol. 8, No. 1, Spring - Summer 2018, p. 171-183

نشریه ماشین‌های کشاورزی
جلد 8، شماره 1، نیمسال اول 1397، ص 183-171

ارائه یک الگوریتم تجزیه بوستروفدون اصلاح شده برای پیکربندی بهینه مزارع مسطح جهت استفاده در سامانه‌های طراحی مسیر وسایل نقلیه کشاورزی

رحمان گودرزی[1]- حسن صدرنیا[2]*- عباس روحانی[3]- مصطفی نوری بایگی[4]

تاریخ دریافت: 1395/06/03
تاریخ پذیرش: 1396/02/23

چکیده

در سال‌های اخیر، عرضه ربات‌های سیار و ماشین‌های مجهز به سامانه‌های هدایت خودکار برای کار در محیط‌های کشاورزی افزایش یافته است. طراحی مسیر برای این سامانه‌ها یک ضرورت است و هم‌چنین یک فرصت جدید برای بهبود بازدهی عملیات زراعی و کاهش اثرات زیست‌محیطی فراهم آورده است. تاکنون راهکارهای زیادی برای برآورده کردن احتیاجات خاص مسئله طراحی مسیر در محیط کشاورزی ارائه شده‌اند. بخش مهم این راهکارها وجود یک توصیف بهینه و سریع از محیط عملیات به‌عنوان یک نقشه مبنا است. در این پژوهش، یک الگوریتم تجزیه برای پیکربندی چندضلعی بیان‌گر محیط عملیات زراعی با ارتقاء روش تجزیه سلولی بوستروفدون در رباتیک ارائه شده است. الگوریتم با ایده حداقل مواجهه با شرایط هزینه‌ساز برای کاهش هزینه با معیار مسافت‌های غیرمؤثر ناحیه سرگاهی طراحی شد و روی مجموعه‌ای از نمونه‌ها (شامل 18 مورد چند ضلعی‌های ساده تا پیچیده) اعمال گردید. سپس با مقایسه آن با حالت عدم تجزیه و روش تجزیه- ادغام به‌عنوان یکی از سریع‌ترین روش‌ها ارزیابی شد. الگوریتم در زمان پردازش بسیار اندک (زیر 100 میلی‌ثانیه و ده‌ها برابر سریع‌تر از روش تجزیه- ادغام) نتایجی بهینه، به‌ویژه در محیط‌های پیچیده ارائه کرده است. نتایج، به‌طور متوسط دو درصد کاهش هزینه را نسبت به حالت عدم تجزیه و روش تجزیه- ادغام نشان می‌دهد و گستره آن از 8- تا 14 درصد نسبت به حالت عدم تجزیه و تا 12درصد نسبت به روش تجزیه- ادغام است. دیگر مزایای الگوریتم، دست‌یابی به پوشش کامل و سازگاری با انواع شکل مزرعه و ماشین‌های زراعی است.

واژه‌های کلیدی: پیکربندی مزرعه، تجزیه بوستروفدون، طراحی مسیر، مزارع مسطح، وسایل نقلیه کشاورزی

مقدمه

در سال‌های اخیر عرضه ربات‌های سیار و ماشین‌های مجهز به سامانه‌های هدایت خودکار برای کار در محیط‌های کشاورزی افزایش یافته است. برنامه‌ریزی حرکت و طراحی یک مسیر از لحظه آغاز تا پایان عملیات برای این سامانه‌های سیار ضروری است. از طرفی با وجود این سامانه‌ها، هم‌چنان راهبرد پوشش مزرعه به تجربه و دانش عمومی انسان وابسته است و الگوهای پوشش کنونی به‌ویژه در محیط‌های پیچیده بهینه نیستند، بنابراین با تعبیه فرآیندهای جستجو و ارائه مسیرهای بهینه، امکان بهره بردن از مزایای این سامانه‌های سیار وجود دارد. به‌عنوان یک نتیجه باید گفت طراحی مسیر[5] بهینه فرصت‌های جدیدی را برای بهبود عملیات زراعی و کاهش اثرات زیست‌محیطی فراهم آورده است.

طراحی مسیر در حوزه رباتیک به‌طور گسترده مطالعه شده است، اما راهکارهای این حوزه به‌طور مستقیم در محیط‌های کشاورزی قابل استفاده نیستند (Bochtis *et al*., 2007; Hameed *et al*., 2010; Driscoll, 2011). دلیل آن را می‌توان ناشی از ماهیت عملیات زراعی و تفاوت‌های ذاتی ماشین‌های مورد استفاده در این دو محیط دانست: ماشین‌های زراعی غیر هولونومیک[6] هستند، هم‌چنین آن‌ها قادر به اجرای عملیات زراعی حین انجام مانورها نیستند. از طرف دیگر دست‌یابی به پوشش کامل سطح مزرعه در عملیات زراعی یک

1- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیزاسیون کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
2- دانشیار، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
3- استادیار، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
4- استادیار، گروه مهندسی کامپیوتر، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد
(*- نویسنده مسئول: Email: hassan.sadrnia@um.ac.ir)
DOI: 10.22067/jam.v8i2.58398

5- Path planning
6- یک سامانه هولونومیک (Holonomic system) قادر به تغییر مسیر با چرخش حول محور مرکزی خود است در حالی‌که سامانه‌های غیر هولونومیک باید مانورهای دور زدن را اجرا کنند؛ این ویژگی، محدودیت‌های سینماتیکی و دینامیکی را به مسئله اضافه می‌کند و شرایط مسئله پیچیده‌تر می‌شود.

ضرورت و در محیط‌های پیچیده یک چالش است. به‌علاوه بعضی عملیات زراعی با مشارکت گروهی از ماشین‌های اصلی[1] و پشتیبان[2] اجرا می‌شوند (مانند عملیات برداشت). در این شرایط، محدودیت ظرفیت[3] ماشین‌ها و بعضاً ناهمسان بودن[4] گروه ماشین‌ها از لحاظ ویژگی‌های عملیاتی، طراحی مسیر را پیچیده‌تر می‌کند.

راهکارهای طراحی مسیر در محیط‌های کشاورزی شامل دو مرحله اصلی "پیکربندی مکانی[5]" و "مسیریابی" وسایل نقلیه کشاورزی[6] می‌باشد[7] (Bochtis *et al*., 2014). در "پیکربندی مکانی" عناصر مکانی محیط عملیات زراعی، تولید و توصیف می‌شوند[8]. توصیف به‌دست آمده سپس در مرحله "مسیریابی" به یک گراف متناظر آن تبدیل می‌شود. رأس‌های این گراف می‌تواند متناظر با عناصر مکانی محیط انجام عملیات مانند مزرعه‌ها، قطعات حاصل از تجزیه سطح، نوارهای کاری[9] و دیگر موارد باشد. همچنین این گراف می‌تواند به‌عنوان یک محیط جستجو، موقعیت مکانی واحدهای سیار مانند نقاط آغازین، پایانی و لحظه‌ای آن‌ها، همچنین اطلاعاتی مانند وضعیت مسیرها را نگه‌داری کند. بنابراین با اعمال الگوریتم‌های جستجو روی این گراف، امکان ارائه یک مسیر دسترسی بهینه بین دو موقعیت مکانی، مربوط به واحدهای سیار و یا تعیین تردد بهینه بین عناصر مکانی محیط عملیات وجود دارد. برای نمونه می‌توان به طراحی مسیر برای واحدهای پشتیبان در عملیات برداشت (Jensen *et al*., 2012) یا پیمایش بهینه پشته‌ها و ارائه الگوهای کاری جدید (و منحصر به شرایط هر مزرعه و عملیات) تحت عنوان الگوهای B-[10] (Bochtis *et al*., 2013) و یا تردد بهینه بین قطعات حاصل از تجزیه در محیط‌های دارای مانع (Hameed *et al*., 2013; Zhou *et al*., 2014) اشاره کرد.

مسیریابی واحد(های) سیار شرکت‌کننده در عملیات زراعی شباهت بسیار زیادی به "مسئله مسیریابی وسیله نقلیه[11]" در مباحث لجستیک دارد. از این رو تاکنون پژوهش‌های زیادی به‌صورت بسط مفهومی و نظری و شبیه‌سازی از چند مسئله شناخته شده در این حوزه ارائه شده است. در همین راستا می‌توان به توسعه نظری "مسئله مسیریابی وسیله نقلیه" برای واحدهای اصلی و پشتیبان (Bochtis and Sørensen, 2009; Bochtis and Sørensen, 2010) و بهینه‌سازی در- لحظه[12] برای مسیریابی پوششی مزرعه (Edwards and Jensen, 2013) اشاره کرد[13]. در مطالعه دیگری، Ali *et al*., 2009 "مسئله جریان شبکه با کم‌ترین هزینه[14]" را برای لجستیک زراعی در عملیات برداشت شبیه‌سازی کردند. پیش از این اثبات شده است که مسئله طراحی مسیر پوششی NP-hard است (Choset, 2001) و امکان دست‌یابی به حل بهینه و دقیق آن در ابعاد واقعی مسئله وجود ندارد و از سوی دیگر افزودن احتیاجات طراحی مسیر در محیط کشاورزی شرایط حل مسئله را پیچیده‌تر می‌کند. این احتیاجات عبارتند از:

استفاده از مسیرهای مستقیم یا منحنی نرم (در تناسب با ماشین‌های مجهز به سامانه‌های هدایت و امکان کاهش هم‌پوشانی)

کاهش هزینه ضمن پوشش کامل سطح مزرعه

تولید قطعات عملیات‌پذیر (تعدادی زیر ناحیه نسبتاً بزرگ و بدون مانع در صورت لزوم تجزیه سطح عملیات)

حداقل زمان پردازش (حداقل زمان محاسباتی به‌دلیل مصارف آنلاین و شرایط ضرورت باز- طراحی عملیات)

عمده این احتیاجات در توان راهکارهای پیکربندی مکانی و به‌طور مشخص روش‌های تجزیه سطح عملیات است و تاکنون

1- Primary unit(s)

2- Service unit(s)

3- بعضی عملیات زراعی همچون عملیات برداشت یا کاشت و مانند آن دارای یک جریان مواد (Material flow) به درون یا بیرون مزرعه است که به آن‌ها عملیات ظرفیتی (Capacitated operations) گفته می‌شود. در مقابل، عملیات غیرظرفیتی (Non-capacitated operations) به عملیاتی مانند خاک‌ورزی و برش علوفه و دیگر موارد مشابه گفته می‌شود که در آن هیچ حالتی از انتقال مواد به درون یا بیرون از مزرعه وجود ندارد. عملیات ظرفیتی با حضور یک گروه از ماشین‌های اصلی (برای انجام عملیات) و تعدادی ماشین‌های پشتیبان (برای خدمت‌رسانی به ماشین‌های اصلی) انجام می‌شود (Bochtis and Sørensen, 2010). در این موارد، تعیین مکان‌های تخلیه و یا بارگیری در عملیات برداشت و یا شارژ مجدد مخزن بذر و سم در عملیات کاشت و داشت و تعیین محل‌های دسترسی به ماشین‌ها می‌تواند بر بازدهی کل عملیات اثر بگذارد، از این رو باید در امر طراحی مسیر مد نظر قرار بگیرد.

4- Non-identical (machines)

5- Spatial configuration

6- (Agricultural vehicles) rout planning

7- این تمایز بین راهکارهای طراحی مسیر در محیط‌های کشاورزی به آن‌چه در رباتیک با عنوان "توصیف" و "الگوریتم" به‌عنوان مؤلفه‌های طراحی مسیر وجود دارند، شباهت دارد؛ برای جزئیات بیش‌تر (Murphy, 2000) را ببینید.

8- فرآیندهای توصیف عناصر مکانی محیط عملیات در مطالعات شامل این موارد می‌شود: توصیف مزرعه‌ها، تجزیه سطح عملیات در محیط‌های پیچیده، تولید ناحیه سرگاه مزرعه، تولید نوارهای کاری و ساده‌سازی مرزهای مزرعه در جریان استخراج نقاط رأسی آن با استفاده از ماشین‌های مجهز به GPS.

9- Field-work tracks

10- B-patterns

11- VRP (Vehicle Routing Problem)

12- Real time

13- مسیریابی واحدهای اصلی و پشتیبان در دو مرحله انجام می‌گیرد: ابتدا مسیرهای پوششی کل مزرعه برای واحدهای اصلی تولید می‌شود، سپس با استفاده از نقشه پراکندگی محصول و یا داده‌های احتمالی و یا به‌دست آمده از حس‌گرها، موقعیت مکانی سرویس‌رسانی برای واحدهای اصلی تعیین می‌شود، در گام بعد با استفاده از موقعیت لحظه‌ای واحدهای پشتیبان، بهترین مسیر دسترسی به واحدهای اصلی به‌دست می‌آید.

14- MCNFP (Minimum Cost Network Flow Problem)

تعدادی روش‌های اصلاح شده بـا منشـأ رباتیـک و تعـدادی راهکـار ابتکاری با هدف برآورده کردن این احتیاجـات ارائـه شـده اسـت. در همین راستا و در یکی از نخستین مطالعات Taïx و همکاران (2006) برای تضمین پوشش کامل سطح مزرعه، الگوریتم پردازش سلول‌های محـدب را توسـعه دادنـد. هـم‌چنـین Ryerson و Zhang (2005) توصیف مزرعه در قالب یک شبکه متشکل از سلول‌های مربعی شکل (گرید) امکان استفاده از الگوریتم ژنتیک را برای دست‌یابی به پوشش کامل (گذر از مرکز تمام سلول‌های گرید) بررسی کردند، با این حـال تنها به پوشـش حـدود 90٪ دسـت یافتنـد. گروهـی نیـز اسـتفاده از ابزارهای تجزیه سلولی فضای آزاد[1] را مد نظر قـرار دادنـد. در همـین راستا Oksanen و Visala (2009) و از تجزیه ذوزنقه‌ای چندضـلعی بیان‌گر مزرعه برای دست‌یابی به پوشش کامل و در ادامه آن، ادغـام قطعات حاصل از تجزیه سطح مزرعه برای تولید نـواحی بـزرگ‌تـر و کاهش هزینه پوشش استفاده کردند. در هر مرحلـه از پیشـروی ایـن الگوریتم، ابتدا یک جهت بهینـه راننـدگی بـر اسـاس یـک الگـوریتم ابتکاری تعیین و در این جهت، چندضلعی تجزیه می‌شود، سپس طی یک گام ادغام، بهترین بلوک (متشکل از یک یا چند قطعه) انتخاب و از ناحیه اصلی کنار گذاشته می‌شود. این مراحل تا پایان فرآیند تجزیه در ناحیه باقی‌مانده تکرار می‌شود. ادغام قطعات بر اساس یـک تـابع هزینه شامل جمع وزنی سه عامل مساحت ناحیه ادغام شده، مسـافت پیموده شده و زمان دور زدن‌ها انجام می‌شود. در مطالعه دیگری، یک روش از حوزه تجزیه سلولی با هدف تولید تعـدادی قطعـات محـدب شـکل در طراحـی مسـیر بـرای عملیـات زراعـی توسـعه داده شـد (Hofstee *et al.*, 2009). این روش تنها در مزارعی با یک تورفتگی کاربرد داشت. روش دیگری از حوزه تجزیه سلولی تحت عنوان تجزیه بوستروفدون برای دست‌یابی به پوشش کامل در محیط‌های پیچیـده برای بالگردهای مورد استفاده در مزارع کشاورزی ارائه شـد (Moon and Shim, 2009). هـم‌چنـین از ایـن روش بـرای تولیـد تعـدادی قطعات ساده و بدون مانع، استفاده شده است (Zhou *et al.*, 2014). در مطالعه دیگری، راهکار متفاوتی با استفاده از راهبرد تجزیه و غلبه تحت عنوان"همه راه‌های تقسیم مزرعه به دو قطعه"بررسی شد (Jin and Tang, 2010). هدف از این روش، دست‌یابی به تجزیـه بهینـه سطح مزرعه و کاهش هزینه پوشش سـطح بـا معیـار مسـافت‌هـای غیرمؤثر ناحیه سرگاهی مزرعه حین دور زدن بود. هم‌چنین Hameed و همکاران (2010) روشی را برای تولید یک توصیف هندسی خودکار و بلادرنگ از محیط عملیات به‌عنوان نقشه مبنـا بـرای راهکارهـای مسیریابی ارائه کردند. در این راهکار، یک توصیف بهینه مدنظر قـرار نگرفته است و در محیط‌های پیچیده زمان محاسـباتی قابـل قبـولی ندارد. در نهایت Driscoll (2011) یک الگوریتم چند مرحله‌ای بـرای ارتقاء دو الگوریتم ارائه شده به‌وسـیله Oksanen و Visala (2009) و Jin و Tang (2010) پیشنهاد کرد. در این الگوریتم، ابتدا یک جهت بهینه اولیه تعیین می‌شود، سپس مزرعه، تنها یک بـار بـا اسـتفاده از تجزیه ذوزنقه‌ای در این جهت تقسیم می‌شود و در ادامه، تنها یک بار و از یک سمت مزرعه، قطعات تولیدی ادغام شده و طی گـام ادغـام، کاهش هزینه پوشش بررسی می‌گردد. با توجه به اصـلاحاتی کـه بـا هدف کاهش فضای جستجو در ایـن الگـوریتم انجـام گرفتـه اسـت، احتمال از دست رفتن جواب‌های بهینه وجود دارد. بـر اسـاس آن‌چـه گفته شد، ابزارهای تجزیه سلولی فضای آزاد، قابلیت زیادی برای حل مسئله طراحی مسیر پوششی در محیط کشاورزی دارند، با ایـن حـال بعضی از روش‌های ارائه شده بـا همـه نـوع شـکل مـزارع سـازگاری نداشته و یا به دلیل بعضی پردازش‌های درونی زمـان‌بـر، در مسـائل واقعی با اندازه بزرگ، کارایی (محاسباتی) ندارند.

هدف از این پژوهش ارائه یک روش تجزیه بهینه به‌عنوان بخش مهمی از واحد پیکربندی در سـامانه‌هـای طراحـی مسـیر در محـیط کشاورزی با در نظر گرفتن همه احتیاجات آن است. این روش، نسخه اصلاح شده یکی از ابزارهای قدرتمند و کارا از حوزه تجزیه سلولی در رباتیک تحت عنوان تجزیه بوستروفدون است، از ایـن رو کـاربرد آن محدود به فضاهای عملیاتی از پیش شناخته شده است کـه مرزهـای محیط عملیات در آن‌ها با استفاده از چندضلعی توصیف شده باشد. با این حال، در صورت وجود محیط‌های توصیف شـده بـا منحنـی‌هـا، امکان تقریب آن‌ها با یک توالی از پاره‌خط‌های مستقیم وجود دارد. به هر حال، در این جا فرض بر وجود آگاهی کـافی از محـیط عملیـات زراعی پیش از اجرای عملیات است. برای دست‌یابی به یک حل بهینه در این پژوهش مفهـوم برخـورد و ایـده حـداقل مواجهـه بـا شـرایط هزینه‌ساز (با معیار مسافت‌هـای غیرمـؤثر ناحیـه سـرگاهی) و روش موازی‌سازی اضلاع چند ضلعی بیان‌گر مزرعه ارائه شده است.

مواد و روش‌ها

راهکار کاهش هزینه مبتنی بـر مفهـوم حـداقل برخـورد بـا اضلاع مزرعه

الگوهای کاری سرگاهی مزرعه به دلیل سادگی در اجرا و تناسب با سامانه‌های هدایت و ماشین‌های خود راهبر کشاورزی تقریباً در همه مطالعات طراحی مسیر مورد استفاده قرار گرفته‌انـد، از ایـن روماننـد عمـده تحقیقـات در ایـن زمینـه، تأکیـد ایـن پـژوهش بـر کـاهش

1- ایده اصلی راهکارهای تجزیـه سـلولی فضـای آزاد (free-space cellular decomposition) تبدیل مسئله پوشش کامل به مسئله پیمایش تعدادی سـلول ساده‌تر و بدون هم‌پوشانی است؛ به‌طوری که با پوشش هر یک از این زیرنواحی بـا حرکات ساده رفت و برگشـتی موسـوم بـه بوسـتروفدون (boustrophedon) و پیمایش همه زیرنواحی، پوشش کامل تضمین می‌شود (Choset, 2001).

مسافت‌های غیرمؤثر حین دور زدن‌ها[1] در مزرعه است. می‌توان گفت برخورد با مرزهای مزرعه می‌تواند پایه‌ای‌ترین عامل هزینه‌ساز با معیار مسافت‌های غیرمؤثر هنگام دور زدن‌ها باشد. در واقع با یک راهبرد پیشگیرانه اگر بتوان به‌طور قابل توجهی از برخورد با اضلاع مزرعه اجتناب کرد، می‌توان انتظار داشت هزینه نیز کاهش یابد. به بیان دیگر برای تحقق ایده حداقل مواجهه با شرایط هزینه‌ساز می‌توان از مسیرهایی به موازات اضلاع مزرعه (با هدف عدم برخورد به آن‌ها) استفاده کرد. به‌عنوان یک نتیجه می‌توان گفت روش موازی‌سازی اضلاع و ایجاد قطعاتی در مجاورت اضلاع مزرعه، می‌تواند به‌عنوان یک راهکار ساده و عملی برای دست‌یابی به کاهش هزینه با معیار مسافت‌های غیرمؤثر ناحیه سرگاهی در نظر گرفته شود.

تجزیه سلولی بوستروفدون اصلاح شده[2] (M-BCD)

در تجزیه بوستروفدون از یک روش شناخته شده در حل مسائل هندسی تحت عنوان الگوریتم صفحه-جاروب (خط- جاروب) برای تجزیه سطح استفاده می‌شود. به‌طور مشخص، این خط با آغاز از یک جهت اولیه مبنا، سطح چندضلعی بیان‌گر محیط عملیات را جاروب می‌کند[3]. در تجزیه بوستروفدون، برخلاف تجزیه ذوزنقه‌ای (شکل a.1) تجزیه تنها در محل رأس‌های بحرانی انجام می‌شود (شکل c.1). رأس بحرانی جایی است که در آن، تعداد اتصال خط جاروب تغییر کند یا بتوان در محل آن رأس، دو پاره‌خط به سمت بالا و پایین کشید: مانند رأس‌های A و C در شکل b.1. این فرآیند تا جاروب کامل سطح در جهت مبنا ادامه می‌یابد. تجزیه بوستروفدون به‌طور کامل در مطالعه (Choset, 2000) ارائه شده است. در ادامه، دو اصلاح برای تجهیز این الگوریتم به روش موازی‌سازی اضلاع برگرفته از ایده حداقل مواجهه با شرایط هزینه‌سازی مبتنی بر مفهوم برخورد اعمال و نسخه اصلاح شده آن (M-BCD) ارائه می‌شود.

تغییر گام به گام جهت جاروب

برای تجهیز الگوریتم تجزیه بوستروفدون به روش موازی‌سازی اضلاع و دست‌یابی به یک حل بهینه، ایده امکان تغییر جهت جاروب در هر مرحله از پیشروی الگوریتم با هدف موازی‌سازی اضلاع تأثیرگذار مزرعه و تولید قطعاتی با شکل نسبتاً ایده‌آل در مجاورت آن‌ها مطرح می‌شود. بدین ترتیب که با آغاز فرآیند تجزیه، جهت بزرگ‌ترین ضلع مزرعه مبنای حرکت خط جاروب قرار می‌گیرد (ضلع شماره 1 در شکل 2)، به بیان دیگر راستای خط جاروب همان جهت بزرگ‌ترین ضلع مزرعه (ضلع مبنا) و جهت حرکت خط جاروب عمود بر جهت ضلع مبنا خواهد بود. با پیشروی خط جاروب و رسیدن به اولین رأس دارای تغییر در اتصال (نقطه بحرانی) تجزیه انجام می‌گیرد (نقطه D1 در شکل 2)، به این معنی که ضلع یا اضلاع جدیدی به موازات ضلع مبنا به مزرعه اضافه و قطعه ایجاد شده کنار گذاشته می‌شود. اگر طول یکی از اضلاع جدید اضافه شده به مزرعه، بزرگ‌تر از طول ضلع مبنا باشد، جهت جاروب تغییر نمی‌کند، در غیر این صورت با جستجو در اضلاع متعلق به ناحیه باقی‌مانده، بزرگ‌ترین ضلع انتخاب شده و مبنای حرکت خط جاروب قرار می‌گیرد. این مراحل تا اتمام فرآیند تجزیه (جاروب کامل سطح مزرعه) ادامه می‌یابد.

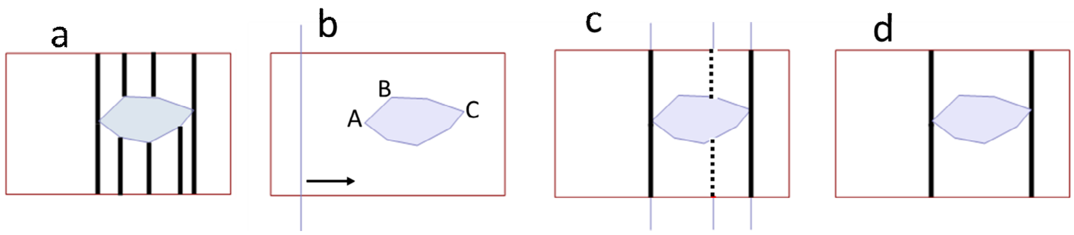
تقسیم مزرعه در محل اضلاع مبنا

برای ایجاد قطعاتی نسبتاً ایده‌آل در مجاورت هر یک از بزرگ‌ترین اضلاع مزرعه، در محل قرارگیری آنها یک برش انجام می‌شود. اگر امتداد این خط برش بلافاصله مرزهای بیرونی را قطع کند، این خط برش، یکی از اضلاع اصلی است، در غیر این صورت در محل ضلع بزرگ، سطح مزرعه تقسیم شده و یک ناحیه در پشت ضلع بزرگ و جزئی از ناحیه باقی‌مانده ایجاد می‌شود (مانند سطح A_1 در شکل 2). بدین ترتیب انتظار می‌رود در پایان فرآیند تقسیم مزرعه، قطعاتی ایده‌آل (مستطیل و ذوزنقه) و نسبتاً ایده‌آل (نزدیک به ذوزنقه) در مجاورت اضلاع بزرگ مزرعه به‌وجود آید که معمولاً دارای دو ضلع بزرگ و موازی هستند (شکل 2). بنابراین برخلاف دیگر روش‌ها در مطالعات پیشین، بدون نیاز به جستجوی اضافی و تحمیل زمان پردازش بیش‌تر، جهت بهینه رانندگی در هر یک از قطعات به موازات ضلع مبنای آن قطعه انتخاب می‌شود. گام‌های الگوریتم تجزیه بوستروفدون اصلاح شده در جدول 1 آمده است.

1- بر اساس تحرکات واحد سیار عوامل زیر را می‌توان بر بازدهی عملیات زراعی مؤثر دانست: نخست مسافت‌های غیرمؤثر ناحیه سرگاهی ناشی از انتقال بین نوارهای کاری (دور زدن‌ها)، دوم مسافت‌های غیرمؤثر ناشی از تردد بین قطعات حاصل از تجزیه مزرعه و سوم ترددهای غیر مؤثر به دلیل ناهماهنگی بین ماشین‌ها در عملیات مشارکتی به‌ویژه عدم تعیین دقیق نقاط دسترسی در عملیات ظرفیتی. مورد اول در همه نوع عملیات وجود دارد با این حال در عملیات ظرفیتی با حضور یک گروه مشارکتی از ماشین‌ها در مزارع بزرگ کم‌رنگ‌تر اما در محیط‌های پیچیده بسیار تأثیرگذار است. از این رو مسافت‌های غیر مؤثر پیموده شده در ناحیه سرگاهی مزرعه در قالب معیارهای مختلفی مانند تعداد دور زدن‌ها، زمان دور زدن‌ها و مسافت پیموده شده حین دور زدن، هدف بهینه‌سازی عمده مطالعات طراحی مسیر بهینه در محیط‌های کشاورزی بوده است.

2- Modified Boustrophedon Cellular Decomposition (M-BCD)

3- استفاده از ابزارهای تجزیه سلولی با استفاده از الگوریتم صفحه- جاروب (Plane-sweep algorithm) وابسته به تعیین یک جهت مبنا برای جاروب سطح است. این وابستگی به دلیل وجود توابع هزینه متفاوت و حساس بودن آن‌ها به تغییرات جهت، یکی از چالش‌های روش‌های تجزیه سلولی است.



شکل 1- a: تجزیه ذوزنقه‌ای، b و c: مراحل تجزیه بوستروفدون با استفاده از الگوریتم خط- جاروب: تعداد اتصال خط جاروب از مقدار "یک" در رأس A به "دو" در محل رأس B تغییر می‌کند (اضلاع نقطه چین) و در محل رأس C به "یک" کاهش می‌یابد، در واقع A و C رأس‌های بحرانی هستند. d: تجزیه بوستروفدون

Fig. 1. a. Trapezoidal decomposition, b to d: Boustrophedon decomposition using plane-sweep algorithm. Connectivity of sweep line changes in location of points A and C (as critical points).

جدول 1- الگوریتم تجزیه بوستروفدون اصلاح شده (M-BCD)

Table 1- Modified boustrophedon cellular decomposition (M-BCD) algorithm

ورودی: چندضلعی P ارائه‌شده با لیستی از پاره‌خطهای بیان‌گر اضلاع مزرعه
Input: Polygon P provided by a list of segments representing the edges of the field
خروجی: تجزیه مزرعه
Output: Decomposed field
0. شروع
0. Start (Get the list of segments representing the filed).
1. ناحیه‌ی باقی‌مانده (R) را برابر باP قرار بده.
1. Set the remaining area (R) equal to the P.
2. مادامی که R مخالف "تهی" است:
2. While remaining area is not equal to "empty", do:
a. ضلع مبنا را در R پیدا کن.
a. Find the base edge in (R)
b. در محل ضلع مبنا، چندضلعی را برش بزن.
b. Cut the polygon in location of base edge
c. جهت جاروب را عمود به جهت ضلع مبنا قرار بده.
c. Set the sweep line direction normal to the base edge direction
d. تجزیه بوستروفدون استاندارد را تا رسیدن به اولین رأس بحرانی اجرا کن.
d. Perform the boustrohedon decomposition algorithm reaching the first critical point
e. زیر ناحیه بسته‌شده را از R حذف کن. R را بروز کن.
e. Delete the recently closed sub region from R, update the R
3. تجزیه را به‌عنوان خروجی برگردان.
3. Rutern the decomposition
4. پایان
4. End

ارزیابی الگوریتم تجزیه بوستروفدون اصلاح شده

الگوریتم تجزیه بوستروفدون اصلاح شده با زبان برنامه‌نویسی ++C در محیط بسته نرم‌افزاری ویژوال استودیو 2013 پیاده‌سازی شد و روی یک رایانه همراه با مشخصات 2.5 GHz Intel(R) core i5 CPU با 4GB RAM به‌اجرا درآمد. برای آن‌که امکان مقایسه نتایج با پژوهش‌های قبلی فراهم شود، یک مجموعه از اشکال مختلف مزارع از پژوهش‌های قبل انتخاب شدند و نقاط رأسی آن‌ها استخراج گردید و برای محاسبات بعدی، شکل‌ها در ابعاد واقعی بزرگ‌سازی شدند. این مجموعه تقریباً همه موارد بررسی شده در پژوهش‌های مورد مقایسه را شامل می‌شود و در جدول 1 ارائه شده است. هم‌چنین این مجموعه تنوع بالایی دارد و اشکال ساده (مزارع محدب و بدون مانع درونی) تا اشکال پیچیده (مزارع دارای تورفتگی‌های متعدد و یک

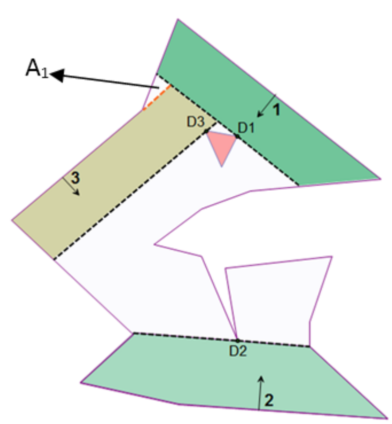
یا چند مانع درونی) در آن دیده می‌شود. هم‌چنین الگوریتم تجزیه ذوزنقه‌ای و ادغام، ارائه شده در مطالعه Driscoll (2011) برای مقایسه عملکرد الگوریتم تجزیه بوستروفدون اصلاح شده پیاده‌سازی گردید. این الگوریتم نسخه سریع الگوریتم تجزیه و ادغام زمان‌بر و بهینه Oksanen و Visala (2009) است. هر دو الگوریتم روی مجموعه نمونه‌ها اعمال شد. برای فراخوانی هرکدام از شکل‌ها، فایل متنی (txt) حاوی نقاط رأسی مزرعه با دو مختصات طول و عرض در هر مرتبه از اجرای الگوریتم به‌عنوان ورودی معرفی شد. هم‌چنین، هزینه پوشش سطح با معیار مسافت‌های غیرمؤثر ناحیه سرگاهی محاسبه شد. برای محاسبه هزینه، تابع هزینه توسعه یافته در مطالعه Jin و Tang (2010) برای یکی از مانورهای معمول ماشین‌های کشاورزی تحت عنوان مانورهای U-شکل استفاده شد. این مانور زمانی اجرا می‌شود که حداقل شعاع گردش ماشین نصف عرض کار است و ماشین با طی یک مسیر نیم دایره‌ای وارد ردیف بعدی می‌شود. در این پژوهش، عرض کار 10 متر و حداقل شعاع گردش 5 متر در نظر گرفته شد. هم‌چنین مقدار مسافت‌های غیرمؤثر ناحیه سرگاهی با فرض پوشش کل مزرعه در یک جهت بهینه کلی (حاصل از کمینه‌یابی تابع هزینه مانورهای U- شکل) به‌عنوان حالت عدم تجزیه مزرعه محاسبه شد.

نتایج و بحث

الگوریتم تجزیه بوستروفدون اصلاح شده، کارایی محاسباتی بسیار بالایی دارد (زمان پردازش موردنیاز آن در حدود چند میلی‌ثانیه و ده‌ها برابر سریع‌تر از الگوریتم تجزیه و ادغام است). این الگوریتم، بدون محدودیت کاربرد در هر نوع چندضلعی بیان‌گر مزرعه (در مجموعه نمونه‌های انتخاب شده) نتایجی نزدیک به بهینه به‌ویژه در محیط‌های پیچیده نسبت به روش تجزیه و ادغام داشته است. مطابق جدول 1 الگوریتم تجزیه بوستروفدون اصلاح شده به‌طور متوسط دو درصد در مجموعه نمونه‌ها نسبت به روش تک جهت بهینه پوشش (حالت عدم تجزیه) و روش تجزیه و ادغام موفق به کاهش هزینه شده است، که مؤید کارایی ایده حداقل مواجهه با شرایط هزینه‌ساز مبتنی بر مفهوم برخورد است. اگرچه الگوریتم تجزیه بوستروفدون بهینه کاهش هزینه قابل توجهی را به‌ویژه در شکل‌های پیچیده نسبت به سایر روش‌های تجزیه ایجاد کرده است، اما امکان از دست رفتن جواب‌های بهینه در شکل‌های ساده وجود دارد که این ضعف، با اصلاحات جزئی می‌تواند رفع شود (مانند مزارع 9، 10، 12 و 13 از جدول 1). برای تبیین الگوریتم تجزیه بوستروفدون اصلاح شده و مقایسه آن با سایر روش‌ها نتایج چند حالت خاص در ادامه بررسی می‌شود.

شکل 2 یک مزرعه نسبتاً ساده (مزرعه 1 در جدول نمونه‌ها) با چند نقطه تورفتگی را نشان می‌دهد که وجود یک مانع درونی در آن نتایج متفاوتی را در روش‌های مختلف ایجاد کرده است.

شکل a.2 نتیجه حاصل از اعمال الگوریتم تجزیه و ادغام بهینه Oksanen و Visala (2009) را نشان می‌دهد. در هر مرحله از پیشروی این الگوریتم، بهترین بلوک (ادغام شده از یک یا چند قطعه حاصل از تجزیه اولیه) انتخاب و از ناحیه اصلی کنار گذاشته می‌شود. این مراحل تا پایان فرآیند تجزیه تکرار می‌شود. در شکل b.2 نیز نتیجه حاصل از اعمال الگوریتم ابتکاری Jin و Tang (2010) مشاهده می‌شود.

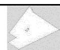
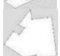
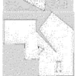
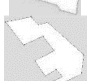


شکل 2- چند مرحله از تجزیه بوستروفدون اصلاح شده (M-BCD) در یک مزرعه با یک مانع درونی مثلث شکل. اعداد 1 تا 3 نشان‌دهنده سه ضلع بزرگ مزرعه هستند، Diها نیز نقاط بحرانی می‌باشند.

Fig. 2. Several steps of modified boustrophedon cellular decomposition (M-BCD) in a field with a triangular obstacle. Numbers 1 to 3 indicates 3-lonegst edges of the field, and D_is are the critical points.

جدول 1- مقادیر مسافت‌های غیرمؤثر در ناحیه سرگاهی در تجزیه بوستروفدون اصلاح شده و سایر روش‌ها

Table 2- Area coverage cost in term of non-effective distance in three decomposition scenarios

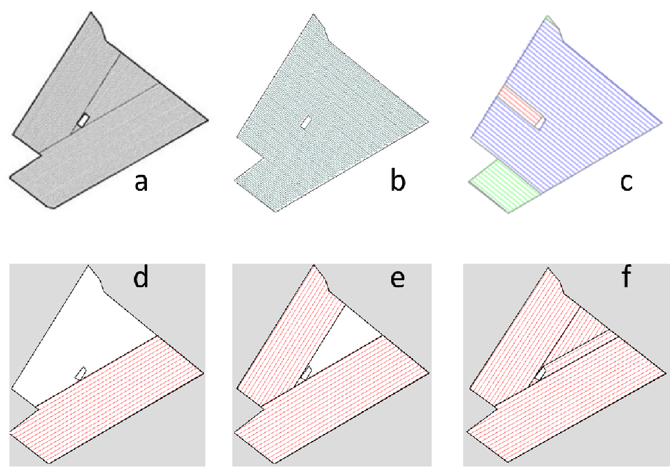
مزرعه Field	شکل Shape	مسافت‌های غیرمؤثر (متر) Non-effective distance			کاهش مسافت‌های غیرمؤثر نسبت به روش‌های دیگر* Cost savings respect to other methods			
		تک جهت بهینه Optimal direction	تجزیه و ادغام Split-merge	تجزیه بوستروفدون اصلاح شده Modified boustrophedon	تک جهت بهینه Optimal direction		تجزیه و ادغام Split-merge	
					m	%	m	%
1		2015	2013	1900	115	6	113	6
2		1539	1539	1539	0	0	0	0
3		962	962	903	59	6	59	6
4		3720	3659	3732	-12	0	-74	-2
5		1634	1627	1634	0	0	-7	0
6		1485	1577	1473	13	1	104	7
7		2592	2592	2592	0	0	0	0
8		5054	4848	4340	714	14	508	10
9		2287	2287	2321	-33	-1	-33	-1
10		1083	1083	1170	-88	-8	-88	-8
11		1106	1106	1106	0	0	0	0
12		2318	2318	2429	-111	-5	-111	-5
13		2326	2326	2376	-50	-2	-50	-2
14		2089	2084	1939	150	7	145	7
15		2892	2892	2825	67	2	67	2
16		3044	3044	2931	113	4	113	4
17		5512	5512	5231	281	5	281	5
18		8055	8016	7039	1017	13	977	12
میانگین Average		2762	2749	2638	124	2	111	2

* علامت مثبت (+) نشان‌دهنده کاهش مسافت و علامت منفی (-) نشان‌دهنده افزایش مسافت است.

هدف از این الگوریتم ارائه یک طرح پوشش بهینه (تجزیه بهینـه و تعیین جهت بهینه پوشش در هر یک از قطعات) بـا اسـتفاده توابـع هزینه تعیین مسافت‌های غیرمؤثر ناحیه سرگاهی بـرای چنـد نـوع از مانورهای معمول ماشین‌های کشاورزی است.

چنان‌که مشخص است این الگوریتم بدون تجزیه سـطح توصـیه بـه پوشش تمام مزرعه در یک جهت بهینه کلی کرده است. در شکل c.2 نیز خروجـی الگـوریتم تجزیـه و ادغـام Driscoll (2011) مشـاهده می‌شود. در این‌جا همانند الگوریتم ابتکاری Jin و Tang (2010) ابتدا یک جهت بهینه تعیین شده و در ادامه بـرخلاف الگـوریتم تجزیـه و ادغام Oksanen و Visala (2009) تجزیه سـطح عملیـات و ادغـام

قطعات حاصل، تنها یک بار و در همان جهت بهینه انجام شده است. اگرچه الگوریتم با بررسی کاهش هزینه حاصل از ادغام قطعات، پنج قطعه تولید کرده است، اما جواب نهایی به یک جهت بهینه کلی تمایل دارد (بخش زیادی از سطح در یک جهت پوشش یافته است) و تنها 2 متر کاهش هزینه نسبت به حالت عدم تجزیه ایجاد کرده است (تفاوت آن با نتایج روش تجزیه و ادغام Oksanen و Visala (2009) قابل توجه است). هم‌چنین در شکل d.2 تا f.3 نتیجه حاصل از تجزیه بوستروفدون اصلاح شده دیده می‌شود. در اینجا ابتدا بزرگ‌ترین ضلع از سمت راست، مبنای موازی‌سازی قرار گرفته است. در ادامه با پیشروی خط جاروب و رسیدن به اولین رأس از سمت راست مانع به‌عنوان رأس بحرانی، تجزیه را انجام داده است. یک قطعه نسبتاً ایده‌آل در کنار اولین ضلع بزرگ ایجاد شده است، هم‌چنین جهت پوشش این قطعه موازی با جهت ضلع مبنا است (شکل d.2). ادامه این فرآیند در سمت چپ مزرعه در شکل e.2 و نتیجه نهایی تجزیه بوستروفدون اصلاح شده در شکل f.2 دیده می‌شود. الگوریتم تجزیه بوستروفدون اصلاح شده بدون نیاز به ادغام قطعات، تنها با یک بار جاروب سطح و در زمان بسیار اندک (7 میلی‌ثانیه و حدود 75 برابر سریع‌تر از روش تجزیه و ادغام با زمان 539 میلی‌ثانیه) نتیجه مشابهی با روش تجزیه و ادغام بهینه و زمان‌بر Oksanen و Visala (2009) ارائه کرده است. الگوریتم تجزیه بوستروفدون اصلاح شده توانسته است با 6 درصد کاهش در مسافت‌های غیرمؤثر (معادل 115متر نسبت به حالت بدون تجزیه و 113 متر نسبت به الگوریتم تجزیه و ادغام) تجزیه را به‌طور مؤثر انجام دهد.



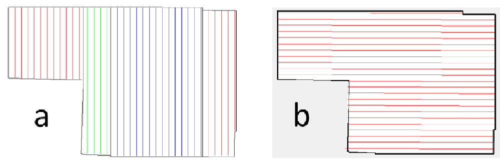
شکل 3- مزرعه 1 و نتایج حاصل از اعمال روش‌های تجزیه، a: تجزیه و ادغام (Oksanen and Visala, 2009) b: الگوریتم ابتکاری (Jin and Tang, 2010) c: تجزیه و ادغام (Driscoll, 2011)، d تا f: مراحل تجزیه بوستروفدون اصلاح شده (آغاز موازی‌سازی از ضلع بزرگ در سمت راست مزرعه (d) در ادامه آن موازی‌سازی ضلع بزرگ دوم در ناحیه باقی‌مانده (e) و نتیجه نهایی M-BCD (f).

Fig. 3. Field 1 and results of decomposition scenarios: a: Spilt-merge by Oksanen and Visala (2009), b: Heuristic method by Jin, and tang (2010), c: Split-merge by Driscoll (2011), e to g: M-BCD.

نکته مهم دیگری که در اینجا باید گفت ضرورت تجزیه در رأس‌های بحرانی (نقاط دارای تغییر در اتصال خط جاروب) ضمن فرآیند تجزیه سطح عملیات است. نقاط دارای تغییر در اتصال یک تعبیر اجرایی-عملیاتی دارد و آن، عدم امکان اجرای پیوسته عملیات پوششی (بدون حرکات بازگشتی) در نواحی اطراف این نقاط است و با تجزیه سطح در محل این نقاط، برنامه‌ریزی حرکت بین قطعات میسر می‌شود. این نکته در مطالعات Oksanen و Visala (2009) و Driscoll (2011) به‌طور ضمنی اشاره شده است، اما در الگوریتم تجزیه بوستروفدون اصلاح شده، تجزیه سطح منحصر به این نقاط است. با این کار سطح عملیات تنها در شرایط ضروری تجزیه می‌شود و مزیت آن را می‌توان عدم تحمیل گام زمان‌بر ادغام به الگوریتم و تولید بزرگ‌ترین قطعه عملیات‌پذیر دانست (شکل 2. d تا 3. f). با این حال در الگوریتم ابتکاری Jin و Tang (2010) این نکته مد نظر قرار نگرفته است (شکل b.2).

بر اساس نتایج به‌دست آمده، مواردی وجود دارد (مانند مزارع 2، 5، 7 و 11 در جدول 1) که هزینه الگوریتم تجزیه بوستروفدون اصلاح شده با حالت عدم تجزیه یکسان است. در واقع در این موارد، جهت ضلع بزرگ همان جهت بهینه پوشش است. اما همیشه جهت

ضلع بـزرگ لزوماً جهـت بهینـه نیسـت و احتمـال از دسـت رفـتن جواب‌های بهینه وجود دارد. شکل 3 یک مزرعه سـاده (مـورد 10 در جدول 1) را نشان می‌دهد که دارای اضلاع متعامد است. در این مورد خط جاروب به موازات ضلع بزرگ در بالای مزرعه پیشـروی خـود را آغاز کرده و در ادامه به سمت پایین حرکت می‌کند، اما به دلیل عـدم وجود نقطه بحرانی طی پیشروی آن تجزیه‌ای انجـام نشـده و تمـام سطح در جهتی یکسان با ضلع بزرگ (ضـلع مبنـای مـوازی‌سـازی) پوشش یافته است. بر اساس نتایج ذکـر شـده در جـدول 1، در ایـن مزرعه خاص روش تجزیه بوستروفدون اصلاح شده 8 درصد معـادل 88 متر نسبت روش تک جهت بهینه و هم‌چنین به‌طور مشابه نسبت به روش تجزیه و ادغام هزینه بیش‌تری تحمیل کرده است.

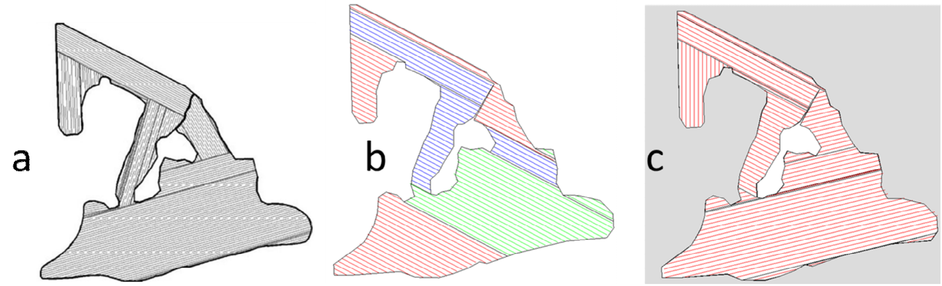


شکل 4- مزرعه 10 و نتایج حاصل از اعمال روش‌های تجزیه a: روش تجزیه و ادغام (Driscoll, 2011)، b: الگوریتم تجزیه بوستروفدون اصلاح شده

Fig. 4. Field 10 and results of decomposition scenarios, Left: Split-merge by Driscoll (2011), Right: Modified boustrophedon cellular decomposition (M-BCD)

نتایج مشابهی نیز برای مزارع 9، 12 و 13 به‌دست آمده است که در بدترین حالت (مزرعه 12) فقط 5 درصد معادل 111 متر نسبت به سایر روش‌های تجزیه هزینه بیش‌تری تحمیل شده است. در توضیح این نتیجه باید گفت که تأکید تجزیه بوستروفدون اصـلاح شـده بـر نقاط دارای تغییر در اتصال است و از ایده امکان تغییر جهت جـاروب در هر مرحله از پیشروی الگوریتم برای دست‌یابی به کـاهش هزینـه استفاده می‌کند. بدیهی است که این فرصت در شکل‌های ساده، کم‌تر به‌وجود می‌آید و انتظار می‌رود در بعضی موارد، جواب بهینه از دسـت برود. با این همه، این موارد با تعیین جهت جاروب بر اساس یک تابع هزینه یا تعبیه یک گام کنترل (مقدار هزینه در جهت بهینه کلـی) در پایان فرآیند تجزیه به سادگی رفع می‌شود.

چنان‌که پیش‌تر گفته شد، روش تجزیه بوستروفدون اصلاح شده به‌ویژه در محیط‌های پیچیده قابلیت زیادی برای کاهش هزینه دارد. شکل 4 یک مزرعه پیچیده (مزرعه 17 از جدول 1) را با تعـداد زیـاد اضلاع (حدود 90 ضلع) و نقاط تورفته متعدد و یک مـانع درونـی بـا شکلی غیر منظم نشان می‌دهد. تجزیه بوستروفدون اصلاح شـده در زمانی بسیار اندک (87 میلی‌ثانیه و حدود 40 مرتبه سریع‌تـر از روش تجزیه و ادغام با زمان 3585 میلی‌ثانیه) به‌خـوبی توانسـت قطعـاتی نسبتاً ایده‌آل در مجاورت اضلاع اصلی مزرعـه ایجـاد کنـد. کـاهش هزینه در این مورد، مقدار 5 درصد برابر با 281 متر نسـبت بـه روش تک جهت بهینه به دست آمد. هم‌چنین نتایج، با روش زمان‌بر تجزیه و ادغـام (Oksanen and Visala, 2009) بسـیار مشـابه اسـت و می‌تواند کارایی الگوریتم تجزیه بوستروفدون اصـلاح شـده را نشـان دهد. می‌توان دید که طرح پوشش به‌دسـت آمـده از روش تجزیـه و ادغام Driscoll (2011) هم‌چون موارد قبل به یک جهت بهینه کلی تمایل دارد (شکل b.4).



شکل 5- مزرعه 17 و نتایج حاصل از اعمال روش‌های تجزیه a: روش تجزیه و ادغام (Oksanen and Visala, 2009) b: روش تجزیه و ادغام (Driscoll, 2011) c: تجزیه بوستروفدون اصلاح شده

Fig. 5. Filed 17 and results of decomposition scenarios, Left: Split-merge by Oksanen and Visala (2009), Middle: split-merge by Driscoll (2011), Right: Optimal solution by (M-BCD**)**

مزارع 6، 8، 14 و 17 از جدول 1 نمونه‌های دیگری از مزارع پیچیده هستند که مقدار کاهش هزینه در آن‌ها نسبت به حالت عدم تجزیه و روش تجزیه و ادغام قابل توجه است. برای نمونه الگوریتم تجزیه بوستروفدون اصلاح شده در مزرعه 8 از جدول 1 مقدار 14 درصد برابر با 714 متر نسبت به روش تک جهت بهینه و 10 درصد برابر با 508 متر نسبت به روش تجزیه و ادغام مسافت‌های غیرمؤثر را کاهش داده است.

نکته دیگر این که طی فرآیند تجزیه تعدادی ضلع جدید به مزرعه اضافه می‌شود که آن‌ها را می‌توان مرزهای مجازی مزرعه دانست. با توجه به این نکته، یکی از مزیت‌های اصلی تجزیه بوستروفدون اصلاح شده این است که طرح تجزیه حاصل از آن، قابلیت اجرای بالایی داشته و با ماشین‌های مرسوم نیز سازگار است. دو دلیل برای آن وجود دارد: اول این که تجزیه بوستروفدون اصلاح شده تنها بر رأس‌های بحرانی تأکید دارد و این نقاط، مکان‌هایی برجسته از محیط عملیات و مرزهای واقعی مزرعه بوده و شناسایی آن‌ها ساده و امکان‌پذیر است. دیگر آن که در این الگوریتم، چیدمان مسیرهای پوششی به موازات اضلاع مزرعه است، (مانند شکل c.2 تا d.3 و شکل 4. c) در نتیجه با آغاز عملیات از کنار اضلاع مزرعه (و حرکت به موازات آن‌ها) و رسیدن به محل رأس‌های بحرانی قطعه جاری پایان می‌یابد و مرزهای مجازی به مرزهای واقعی تبدیل می‌شوند.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش یک الگوریتم تجزیه چندضلعی بیان‌گر مزارع مسطح (با ناهموارهای قابل اغماض) برای حل مسئله طراحی مسیر پوششی ارائه شد. این الگوریتم، نسخه اصلاح شده و ارتقاءیافته روش تجزیه سلولی بوستروفدون در رباتیک است. این الگوریتم برخلاف بعضی از روش‌های پیشین، محدودیت کاربرد در هیچ محیط عملیاتی از پیش شناخته شده و توصیف شده با موجودیت هندسی چندضلعی را ندارد. نتایج نشان داد که انتخاب الگوریتم تجزیه بوستروفدون و تجهیز آن به روش موازی‌سازی اضلاع چند ضلعی، توانست مسافت‌های غیرمؤثر را به‌طور مناسبی کاهش دهد و نتایجی بهینه را در زمان بسیار اندک ارائه کند. الگوریتم بدون نیاز به ساز و کار زمان‌بر تجزیه و ادغام، قادر به کاهش هزینه پوشش سطح است. دیگر این که طرح تجزیه و پوشش حاصل از این الگوریتم، قابلیت اجرای بالایی دارد و حتی با ماشین‌های مرسوم در کشاورزی نیز سازگار است.

عملکرد الگوریتم در محیط‌های پیچیده بسیار موفق بود و کاهش هزینه در این موارد قابل توجه است، با این حال در محیط‌های ساده، از دست رفتن جواب‌های بهینه را می‌توان انتظار داشت که این ضعف، با افزودن یک گام ارزیابی (هزینه در یک جهت بهینه کلی) به سادگی رفع می‌شود. هم‌چنین تأکید اصلی الگوریتم تجزیه بوستروفدون اصلاح شده بر موازی‌سازی مناسب‌ترین تک ضلع‌ها از چندضلعی بیان‌گر مزرعه است؛ برای بهبود الگوریتم، این گزینه می‌تواند با مناسب‌ترین زنجیره‌های چندضلعی با یک انحنای مناسب جایگزین شود. با این ارتقاء امکان دست‌یابی به کاهش هزینه قابل توجه در محیط‌های دارای مرزهای منحنی نیز وجود دارد (مانند مزارع 15 و 16 از جدول 1).

الگوریتم ارائه شده قابلیت‌های ویژه‌ای دارد و می‌تواند به‌عنوان بخش مهمی از واحد پیکربندی در سامانه‌های طراحی مسیر برای توصیف محیط عملیات و تولید یک نقشه راهبری برای مسیریابی وسایل نقلیه کشاورزی مورد استفاده قرار گیرد. با این حال محدودیت‌هایی وجود دارد: الگوریتم تجزیه اصلاح شده، سطح را به‌طور دلخواه تجزیه می‌کند؛ از این رو کاربرد آن در کشت‌های ردیفی، محدود به تولید تعدادی زیرنواحی ساده و بدون مانع در جهت ردیف‌های کشت می‌شود. هم‌چنین این الگوریتم در مزارع دارای ناهمواری‌های قابل توجه، کارایی نداشته و طراحی ویژه‌ای در این شرایط مورد نیاز است. مهم‌تر از همه، تعیین تردد بهینه بین قطعات حاصل از تجزیه است که در توان راهکارهای مسیریابی است و برای مطالعه بعدی پیشنهاد می‌شود. همچنین این الگوریتم، نیازمند ارزیابی عملی در سطح مزرعه با استفاده از ماشین‌های کشاورزی خودراهبر و یا ربات‌های سیار است.

References

1. Ali, O., B. Verlinden, and D. Van Oudheusden. 2009. Infield logistics planning for crop-harvesting operations. Engineering Optimization 41: 183-197.
2. Bochtis, D. D., C. G. C. Sørensen, and P. Busato. 2014. Advances in agricultural machinery management: A review. Biosystems Engineering 126: 69-81.
3. Bochtis, D. D., and C. G. Sørensen. 2009. The vehicle routing problem in field logistics part I. Biosystems Engineering 104: 447-457.
4. Bochtis, D. D., and C. G. Sørensen. 2010. The vehicle routing problem in field logistics: Part II. Biosystems engineering 105 (2): 180-188.
5. Bochtis, D. D., C. G. Sørensen, P. Busato, and R. Berruto. 2013. Benefits from optimal route planning

based on B-patterns. Biosystems Engineering 115: 389-395.
6. Bochtis, D. D., S. Vougioukas, C. Tsatsarelis, and Y. Ampatzidis. 2007. Optimal dynamic motion sequence generation for multiple harvesters. In Proceedings of the Automation Technology for Off-road Equipment (ATOE) 2006 Conference, Bonn, Germany (pp. 33-40).
7. Choset, H. 2000. Coverage of known spaces: The boustrophedon cellular decomposition. Autonomous Robots 9 (3): 247-253.
8. Choset, H. 2001. Coverage for robotics–A survey of recent results. Annals of mathematics and artificial intelligence 31 (1-4): 113-126.
9. Driscoll, T. M. 2011. Complete coverage path planning in an agricultural environment. Graduate Theses and Dissertations. Paper 12095. Faculty of computer. Iowa state University. USA.
10. Edwards, G., and M. A. F. Jensen. 2013. Real Time Optimisation of Field Coverage Route Planning with Limited Capacitance Machinery and Spatial Variability. International Commission of Agricultural and Biological Engineers, Section V. CIOSTA XXXV Conference "From Effective to Intelligent Agriculture and Forestry", Billund, Denmark, 3-5 July 2013.
11. Hameed, I. A., D. D. Bochtis, and C. G. Sørensen. 2013. An optimized field coverage planning approach for navigation of agricultural robots in fields involving obstacle areas. International Journal of Advanced Robotic Systems 10 (231): 1-9.
12. Hameed, I. A., D. D. Bochtis, C. G. Sørensen, and M. Nøremark. 2010. Automated generation of guidance lines for operational field planning. Biosystems Engineering 107: 294-306.
13. Hofstee, J. W., L. E. E. M. Spätjens, and H. Ijken. 2009. Optimal path planning for field operations. In Proceedings of the 7th European conference on precision agriculture Precision Agriculture 09 (pp. 521-529). Netherlands: Wageningen.
14. Jensen, M. A. F., D. Bochtis, C. G. Sørensen, M. R. Blas, and K. L. Lykkegaard. 2012. In-field and inter-field path planning for agricultural transport units. Computers & Industrial Engineering, 63: 1054-1061.
15. Jin, J., and L. Tang. 2010. Optimal coverage path planning for arable farming on 2D surfaces. Transactions of the ASABE, 53 (1): 283-295.
16. Moon, S. W., and D. H. C. Shim. 2009. Study on path planning algorithms for unmanned agricultural helicopters in complex environment. International Journal of Aeronautical and Space Sciences 10 (2): 1-11.
17. Murphy, R. 2000. Introduction to AI robotics. MIT press.
18. Oksanen, T., and A. Visala. 2009. Coverage path planning algorithms for agricultural field machines. Journal of Field Robotics 26 (8): 651-668.
19. Ryerson, A. F., and Q. Zhang. 2006. Vehicle path planning for complete field coverage using genetic algorithms. Vehicle path planning for complete field coverage using genetic algorithms. In Proceedings of the Automation Technology for Off-road Equipment (ATOE) 2006 Conference, Bonn, Germany (pp. 309-317).
20. Taïx, M., P. Souères, H. Frayssinet, and L. Cordesses. 2006. Path planning for complete coverage with agricultural machines. In Field and service robotics pp. 549-558. Springer Berlin Heidelber.
21. Zhou, K., A. Leck Jensen, C. G. Sørensen, P. Busato, and D. D. Bochtis. 2014. Agricultural operations planning in fields with multiple obstacle areas. Computers and Electronics in Agriculture 109: 12-22.

Journal of Agricultural Machinery
Vol. 8, No. 1, Spring - Summer 2018, p. 171-183

نشریه ماشین‌های کشاورزی
جلد 8، شماره 1، نیمسال اول 1397، ص 183-171

Presentation of a Modified Boustrophedon Decomposition Algorithm for Optimal Configuration of Flat Fields to use in Path Planning Systems of Agricultural Vehicles

R. Goudarzi[1]- H. Sadrnia[2*]- A. Rohani[3]- M. Nouribaygi[4]
Received: 24-08-2016
Accepted: 13-05-2017

Introduction

The demand of pre-determined optimal coverage paths in agricultural environments have been increased due to the growing application of field robots and autonomous field machines. Also coverage path planning problem (CPP) has been extensively studied in robotics and many algorithms have been provided in many topics, but differences and limitations in agriculture lead to several different heuristic and modified adaptive methods from robotics. In this paper, a modified and enhanced version of currently used decomposition algorithm in robotics (boustrophedon cellular decomposition) has been presented as a main part of path planning systems of agricultural vehicles. Developed algorithm is based on the parallelization of the edges of the polygon representing the environment to satisfy the requirements of the problem as far as possible. This idea is based on "minimum facing to the cost making condition" in turn, it is derived from encounter concept as a basis of cost making factors.

Materials and Methods

Generally, a line termed as a slice in boustrophedon cellular decomposition (BCD), sweeps an area in a pre-determined direction and decomposes the area only at critical points (where two segments can be extended to top and bottom of the point). Furthermore, sweep line direction does not change until the decomposition finish. To implement the BCD for parallelization method, two modifications were applied in order to provide a modified version of the boustrophedon cellular decomposition (M-BCD). In the first modification, the longest edge (base edge) is targeted, and sweep line direction is set in line with the base edge direction (sweep direction is set perpendicular to the sweep line direction). Then Sweep line moves through the environment and stops at the first (nearest) critical point. Next sweep direction will be the same as previous, If the length of those polygon's newly added edges, during the decomposition, are less than or equal to the base edge, otherwise a search is needed to choose a new base edge. This process is repeated until a complete coverage. The second modification is cutting the polygon in the location of the base edge to generate several ideal polygons beside the base edges. The algorithm was applied to a dataset (including 18 cases, ranging from simple-shaped to complex-shaped polygons) gathered from other studies and was compared with a split-merge algorithm which has been used in some other studies. The M-BCD algorithm was coded in C++ language using Microsoft Visual Studio 2013 software. Algorithm was run on a laptop with 2.5 GHz Intel(R) core™ i5-4200M CPU, processor with 4 GB of RAM. Also Split-merge algorithm provided by Driscoll (2011) was coded. Two algorithms were applied to the dataset. Cost of coverage plan was calculated using cost function of U-shaped turns in study Jin and Tang (2010). In this paper machine-specific parameters were working width 10 m and minimum turning radius 5 m.

Results and Discussion

Based on the results, the proposed algorithm has low computational time (below 100 ms in dataset and runs many times (on average 75 times) faster than split-merge algorithm. Algorithm resulted in a calculated savings

1- Graduated Student, Agricultural Mechanization Engineering, Department of Biosystems Engineering, Ferdowsi University of Mashhad
2- Associate Professor, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad
3- Assistant Professor, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad
4- Assistant Professor, Department of Computer Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad
(*- Corresponding Author Email: hassan.sadrnia@um.ac.ir)

up to 12% and on average 2% than the split-merge algorithm. Another consequence from parallelization method was effectiveness of multi-optimal direction coverage pattern than a single-optimal direction coverage; a calculated savings up to 14% and 2% on average than a single optimal direction achieved. Algorithm was evaluated on several test cases in detail. Based on the results, it is possible to loose optimal solutions especially in the case of simple shaped environments (in terms of number of convex points and internal obstacles), for example case 10 in dataset, is a case with a number of orthogonal edges. Reviewing the algorithm and Figure 4 demonstrate that sweep line moves down from the first longest edge in top of the polygon, and it doesn't stop during the process until the whole area is covered with a single coverage path direction (parallel to the longest edge). As it can be seen, no decomposition is proposed, because sweep line has faced no critical points. Based on the results in Table 2, there is 8% (equal to 88m) more cost (in term of the non-effective distance) in this case than an optimal direction and the split-merge algorithm. There are similar cases in the dataset: number 9, 12 and 13. This condition rarely occurs in complex environments, but in general it can be prevented by using an evaluation step at the end of the decomposition process. Ideally, the cost of coverage plan must be significantly less than related costs of a single optimal direction. Unlike the simple cases, algorithm returns near the optimal solution, especially in the case of complex environments. A good example of this ability of the algorithm can be seen in Figure 6. This field is case 17 in the dataset. It has many edges (almost 90 edges) and several non-convex points and an internal irregular shaped obstacle. M-BCD algorithm in a very short time (87 ms) generated several near to ideal shaped sub-regions around the field. Algorithm resulted in a calculated saving of 5% than an optimal direction with minimum non-effective distance. We can see the solution of split-merge algorithm by Oksanen and Visala (2009) in Figure 6, it can be clearly seen that coverage pattern by M-BCD is very close to the high time-consuming and optimal split-merge algorithm by Oksanen and Visala (2009). It verifies that M-BCD is efficient and optimal. There are similar test cases as hard cases in which considerable savings has been achieved (cases 6, 8 and 14).

Conclusions

In this paper a modified decomposition algorithm as a main part of path planning systems in agricultural environments was presented. Proposed algorithm uses method of parallelization of the edges of polygon. This method is based on encounter concept and "minimum facing to cost making condition". Although the general problem had been proved to be NP-hard problem, the method has limited the search space correctly and effectively which resulted close to the optimal solutions quickly. Another advantage of the method is suitability of the solutions for any kind of machine and any polygonal flat field (and those which can be considered as flat fields).

Keywords: Agricultural vehicles, Boustrophedon decomposition algorithm, Flat fields, Field configuration, Path planning